

## Развитие прецизионной фотометрии и радиометрии

**Назаренко Л.А. д.т.н., проф.**

Харьковская национальная академия городского хозяйства,  
ул. Революции, 12, Харьков-61002, Украина,  
тел.: (+38 057) 707 3242, e-mail: [Lnazarenko@ksame.kharkov.ua](mailto:Lnazarenko@ksame.kharkov.ua)

**Тимофеев Е.П. к.т.н.**

Национальный научный центр “Институт метрологии”,  
ул. Мироносицкая, 42, Харьков-61002, Украина,  
тел.: (+38 057) 704 9750, e-mail: [timofeev@metrology.kharkov.ua](mailto:timofeev@metrology.kharkov.ua)

*В работе приведен анализ состояния метрологического обеспечения в области фотометрии и радиометрии. Показана необходимость проведения дискуссий по возможному переопределению канделы в терминах квантовых единиц - фотонов. Выделена первоочередная задача по переходу от измерения мощности монохроматического излучения к измерению количества фотонов. Приведены экспериментальные результаты возможной реализации единиц люмена и канделы с использованием стабилизированного по мощности и частоте лазера и приемника трап-детектора со 100% квантовой эффективностью. Полученная предварительная оценка погрешности измерений мощности лазерного излучения не превышает 0,05%.*

**Введение.** Главной проблемой современной радиометрии является перекрытие широкого диапазона радиометрических измерений надежными и прослеживаемыми методами. Динамический диапазон радиометрии распространяется на более чем 13 порядков. Проблема же динамического диапазона в фотометрии «решается» собственно глазом. Для фотометрических измерений и для фотометрических единиц связи с системой единиц СИ реализуются через определение канделы и фотометрическую систему МКО. Для радиометрии ситуация отличается, потому что разные типы инструментов основаны на разных физических принципах. Поэтому для радиометрических величин и радиометрических единиц связь с системой единиц СИ более сложна, особенно для установления такой связи в полном динамическом диапазоне.

В классической радиометрии высоких уровней потоков первичная оптическая радиационная шкала для источников и приемников базируется на криогенном радиометре с прослеживаемой связью с системой единиц СИ через электрические единицы. Для работ в ультрафиолетовой (УФ), глубоко ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра первичные шкалы основаны на вычисляемых источниках, таких как синхротрон или Планковский излучатель с прослеживаемостью к системе единиц СИ через единицы термометрии, электричества и длины.

При очень низких уровнях потоков в режиме счета фотонов имеет место потеря точности. Поэтому для высокоточной абсолютной радиометрии на квантовом уровне необходимы надежные квазиединичные фотонные источники и фотонные приемники.

Современный прогресс, произведенный в управлении и подсчете одиночных фотонов и создании источников единичных фотонов, обещает в течении ближайших нескольких лет создание радиационных потоков с точно определенным числом фотонов за секунду. Это даёт толчок к развитию в метрологии новых квантовых эталонов и новых квантовых методов калибровки. С этой целью предлагается переопределение канделы в терминах фотонных единиц. Это переопределение рассматриваем как небольшой, но полезный шаг в направлении будущего фотометрии и радиометрии, шаг в направлении к квантовой метрологии. Эта формулировка будет также находиться в гармонии с предлагаемыми переопределениями четырех из семи базовых единиц системы СИ единиц - килограмма, ампера, кельвина и моля - в терминах фундаментальных констант.

**Воспроизведение единиц люмена и канделы.** В 2009 г. Консультативный комитет радиометрии и фотометрии (ККРФ) рекомендовал такое определение канделы:

„Кандела – единица силы света в заданном направлении, так что световая эффективность монохроматического излучения частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц равна точно 683 кандела стерадиан на ватт.”

ККРФ подтвердил, что концепция «световая эффективность излучения» вполне установлена в области фотометрии, и ввел фундаментальную константу для фотометрии  $K_{cd}$ .

„Таким образом, мы имеем точное соотношение  $K_{cd} = 683$  лм/Вт. Эффект этого определения в том, что кандела есть сила света в заданном направлении источника, который излучает монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц и имеет силу излучения в этом направлении  $1/683$  ватт на стерадиан. Эта сила излучения соответствует интенсивности фотонов  $(683 \cdot 540 \cdot 10^{12} \cdot 6,62606896 \cdot 10^{-34})^{-1}$  фотонов в секунду на стерадиан. „

В настоящее время наиболее стабильным источником монохроматического излучения является лазер. Вышеприведенное определение канделы соответствует длине волны излучения лазера 555.016 нм. К сожалению, стабильных лазеров на этой частоте пока нет. Но для оценки метода возможно использование лазера на другой частоте с последующим пересчетом полученной величины. В качестве счетчика фотонов можно использовать приемник со 100% внешней квантовой эффективностью.

Нами были проведены экспериментальные исследования по возможной реализации единиц люмена и канделы с использованием стабилизированного по мощности и частоте лазера и приемника трап-детектора со 100% квантовой эффективностью. В качестве источника использовался модернизированный лазер на базе ЛГН -302. Относительная нестабильность частоты такого лазера не превышала  $1 \cdot 10^{-8}$  за времена усреднения не менее 1с. Относительная нестабильность мощности лазера не превышала  $1 \cdot 10^{-4}$ . Для дополнительного контроля уровня выходной мощности использовался приемник-свидетель. Трап-детектор выполнен на базе фотодиодов фирмы Хамаматсу S1337-1010ВК. Исследования показали, что в таком устройстве внешняя квантовая эффективность, на рабочей длине волны лазера, достигает значения 99,95 %. Выходная

мощность модернизированного лазера составила 2,245 мВт. Полученная предварительная оценка погрешности измерений мощности лазерного излучения не превышает 0,05%.

**Выводы.** Эволюция фотометрии, радиометрии рассмотрена с точки зрения потребностей и развития, как в классическом, так и в квантовом мире. Показана необходимость проведения дискуссии по возможному переопределению канделы в терминах квантовых единиц – фотонов.

Выделена первоочередная задача по переходу от измерения мощности монохроматического излучения к измерению количества фотонов.

Приведенные экспериментальные результаты подтверждают возможность реализации единиц люмена и канделы с использованием стабилизированного по мощности и частоте лазера и приемника трап-детектора со 100% квантовой эффективностью.

Полученная предварительная оценка погрешности измерений мощности лазерного излучения не превышает 0,05%.